

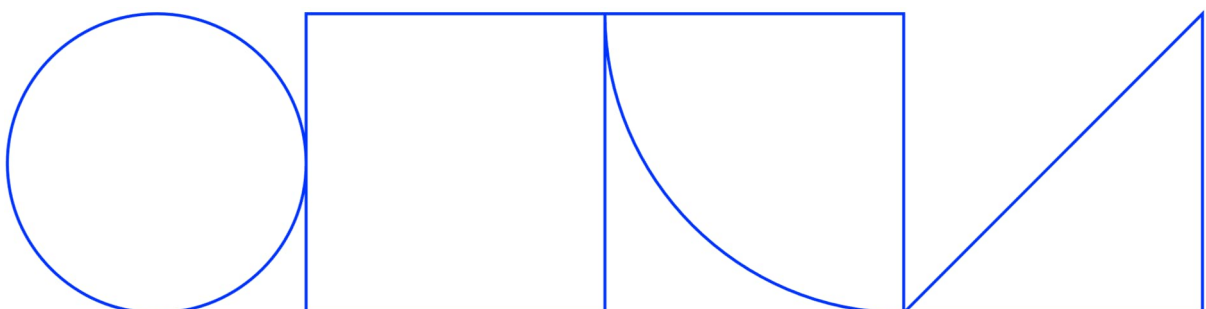
# Hållbar dagvattenhantering i urbana miljöer steg 2

---

Robert Furén

NCC

2025-03-26



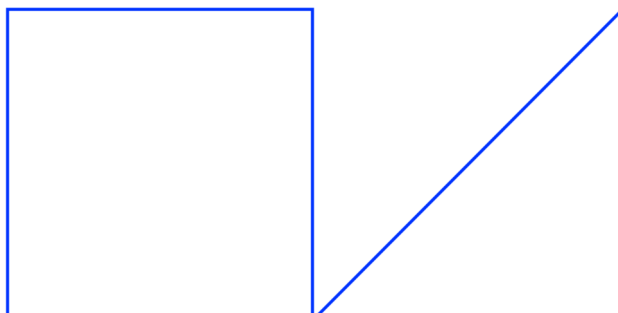
## Förord

Detta industridoktorandprojekt är ett samarbete mellan NCC och Luleå tekniska universitet (LTU), och delfinansierat av SBUF. Projektet har genomförts vid Luleå tekniska universitet (LTU) i forskningsämnet VA-teknik, inom avdelningen Arkitektur och vatten vid institutionen för samhällsbyggnad och naturresurser. Projektet är en del av DRIZZLE, centrum för dagvattenhantering, ett av VINNOVA:s kompetenscentrum för forskning i världsklass inom områden viktiga för Sverige. Projektet har genomförts under ledning och stöttning av huvudhandledare professor Godecke Blecken (LTU), biträdande handledare professor Maria Viklander (LTU) och industrihandledare Marie Kruså (NCC).

Denna rapport utgör en sammanfattning av doktorsavhandlingen "Stormwater bioretention systems: Water quality treatment and long-term pollutant accumulation" (Furén, 2025), vilken redovisar det forskningsarbete som genomförts under Robert Furéns doktorandstudier.

Författaren vill rikta ett stort tack till de finansiärer som möjliggjort detta projekt: SBUF, NCC, LTU och VINNOVA (Grant no. 2016–05176 och 2022–03092). Ett stort tack riktas även till projektets referensgrupp som bistått med värdefull information, synpunkter och givande diskussioner vid referensgruppsmöten. Referensgruppen har bestått av Lars Benzeriane och Stefan Indahl (Aarsleff), Olof Jonasson (Tyréns), Marie Kruså (NCC) och Eva Vall (SVOA).

Robert Furén, mars 2025



## Sammanfattning

Våra städer påverkas av mänskliga aktiviteter och verksamheter vilka producerar föroreningar som vid nederbörd leds till och blir en belastning för sjöar och vattendrag. Förståelsen för dagvatten och föroreningar har ökat intresset för att rena och behandla dagvatten. Biofilter är en populär teknik som anses effektiv för rening av dagvatten, dock finns kunskapsluckor om långtidseffekt, funktion i kallt klimat, inverkan av vägsalter på rening, men även frågor kopplade till drift och underhåll.

Syftet i denna avhandling har varit att studera biofilter och dess funktion över tid för att rena dagvatten. Fokus har varit på filtermaterial särskilt framtagna för kallt klimat, inverkan av vägsalter på rening, långtidseffekt av försedimentering, men även förekomst, ackumulering och koncentrationer av föroreningar. Studierna omfattar bland annat en omfattande fältstudie med provtagning av 29 biofilter i USA (äldre filter som varit i drift 7–16 år vid provtagning), 18 biofilter i Malmö samt 3 i Sundsvall samt 4 i Stockholm.

Resultaten visar på en stor förekomst av metaller (Cr, Cu, Ni, Pb och Zn) likväl som organiska föroreningar (16 PAH, 7 PCB, 13 ftalater och 2 alkylfenoler). Studien visar att det finns risk för läckage av t ex metaller ur biofilter över tid. Halter bland annat av PCB och PAH är höga och arbetsmiljörisk föreligger för personal som arbetar med drift och underhåll. Över tid är reningen god i filtren, även i filter särskilt anpassade för kallt klimat. Vägunderhåll med vägsalt ökar risk för läckage av metaller från biofilter, dock kan kontinuerligt underhåll av biofilter minska dessa risker. En försedimentering kan underlätta drift och underhåll, samt upprätthålla god reningsfunktion över en längre tid.

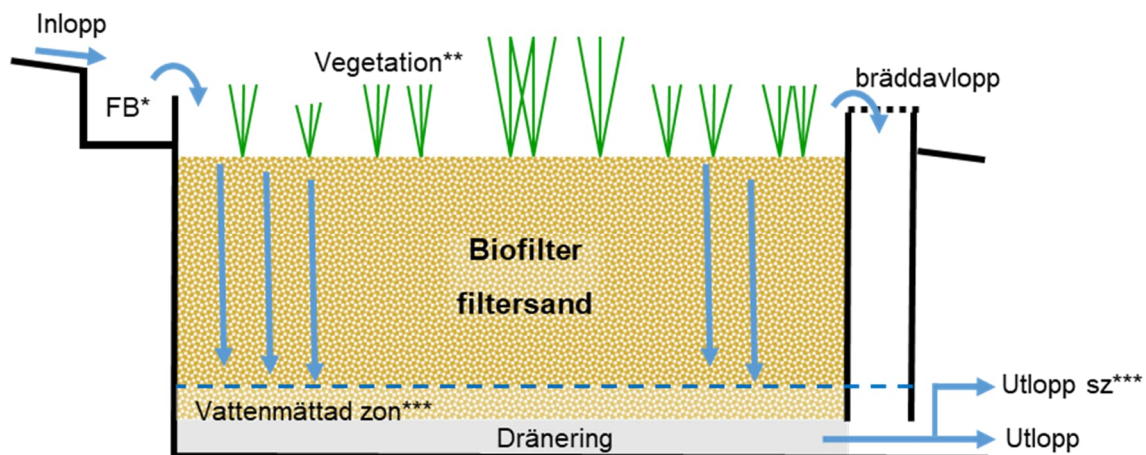
Slutsatserna i denna avhandling bidrar med kunskap till att utveckla bättre metoder för dagvattenhantering och därigenom en hållbar utveckling av framtida städer. Av praktisk betydelse är att regelbundet underhåll, rengöring av försedimentering och periodvis byte av översta filterlagret kan säkerställa en bibehållen reningsfunktion över längre tid. I kallt klimat rekommenderas filter med god infiltrationsförmåga (högre än vad som normalt används) särskilt avsedda för dagvattenrening i kalla klimat.

# Innehållsförteckning

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| Förord                           | 1  |
| Sammanfattning                   | 2  |
| 1 Bakgrund                       | 4  |
| 2 Syfte och mål                  | 5  |
| 3 Metod och genomförande         | 6  |
| 4 Resultat                       | 9  |
| 4.1 Rening av metaller           | 9  |
| 4.1.1 Inverkan av klorider       | 10 |
| 4.2 Ackumulering av föroreningar | 10 |
| 4.2.1 Organiska föroreningar     | 10 |
| 4.2.2 Metaller                   | 12 |
| 4.2.3 Sekventiell lakning        | 12 |
| 4.3 Försedimentering             | 13 |
| 5 Slutsatser                     | 14 |
| 5.1 Praktisk tillämpning         | 15 |
| 6 Rekommenderade vidare studier  | 16 |
| Litteraturförteckning            | 17 |
| Publikationslista                | 17 |
| Presentationslista               | 19 |
| Referenslista                    | 20 |

# 1 Bakgrund

Dagvatten är en del av den urbana hydrologiska cykeln och spelar en viktig roll vid utformningen av hållbara städer. Hårdgjorda ytor ger snabb avrinning och genom antropogena<sup>1</sup> aktiviteter och verksamheter producerar städer en rad olika föroreningar, t ex metaller, PAH, PCB och mikroplaster (Müller et al., 2020). Vid nederbörd och snösmältning leds föroreningar till sjöar och vattendrag där de blir en belastning för recipient och vattenmiljö (Barbosa et al., 2012; Müller et al., 2020). Rent vatten är essentiellt för människor och djur varför det är av stor vikt att vi skyddar och hanterar vårt vatten på bästa sätt. Val av anläggningstyp för omhändertagande av dagvatten är beroende av platsspecifika förutsättningar t ex föroreningars koncentrationer, klimat, mark- och grundvattenförhållanden och recipientens känslighet. Biofilter (Figur 1) är en allt mer förekommande reningsteknik för dagvatten (Croft et al., 2024; Davis et al., 2009), bra på att rena föroreningar, såsom suspenderat material (Hsieh and Davis, 2005), metaller (Blecken et al., 2009a) och ett flertal organiska föroreningar (PAH och PCB) (Zhang et al., 2014).



Figur 1. Principskiss av ett biofilter, där den huvudsakliga rening av dagvatten sker i filtermaterialet. \*Föresedimentering (FB), \*\*vegetation i förekommande fall samt \*\*\*vattenmättad zon (sz) i förekommande fall.

Biofilter är växtbevuxna infiltrationsbäddar där vattnet från omgivande ytor renas av växter och filtermaterial (Tirpak et al., 2021). Filtermaterialen består vanligtvis av jord/sandblandningar ibland med ett översta lager organiskt material (SV 2016-05), men kan även innehålla olika tillsatser, t ex pimpsten eller kalk. En fördel med biofilter (jämfört med till exempel sedimentationsanläggningar) är att de i högre grad kan avskilja lösta föroreningar. Tidigare studier av biofilter visar att ackumulerade föroreningar kan verka som en föroreningsdepå i biofilter vilket över tid kan utgöra en potentiell föroreningskälla (Davis et al., 2003). För att upprätthålla god reningsfunktion kräver grön infrastruktur (t ex biofilter) regelbundet underhåll (Graham and Lei, 2000; Hoyt and Brown, 2005).

<sup>1</sup> Antropogena processer eller effekter är sådana som kan härledas ur mänskliga aktiviteter

Forskning likväl som praktiska erfarenheter visar att underhåll av dagvattenanläggningar ofta är otillräckligt med försämrad funktion som resultat (Al-Rubaei et al., 2015; Lindsey et al., 1992; Starzec et al., 2005). Studier har även visat att dessa anläggningar på grund av bristande underhåll ibland inte fungerar alls (Al-Rubaei et al., 2013; Bergman et al., 2011). Trots tidigare intensiv forskning på biofilter kvarstår frågor angående biofilter och långtidsfunktion (Blecken et al., 2017), t ex. föroreningars förekomst och tillgänglighet i biofilter, funktion i kallt klimat (Kratky et al., 2017). Då huvudsaklig ackumulation sker i filtermaterialer (Blecken et al., 2009b) är det av särskilt stor vikt att förstå processer som styr ackumulering och mobilisering av föroreningar i filtermaterialet. Mycket av tidigare forskning på biofilter har bedrivits i laboratorier, i pilotstudier eller i korta projekt på nyinstallerade fältanläggningar (Kratky et al., 2017). Därav studerades i detta projekt tre större fältanläggningar i Sverige (totalt 25 biofilter). Dessutom genomfördes i samverkan med Ohio State University mycket omfattande fältstudier på biofilter i norra USA med provtagning från 29 olika biofilter. Totalt pågick provtagning av dagvatten under två års tid med analyser av förekomst och koncentration av metaller (Cr, Cu, Ni, Pb och Zn) samt i filtermaterial och sediment även 38 olika organiska föroreningar (16 PAH, 7 PCB, 13 ftalater och 2 alkylfenoler).

## 2 Syfte och mål

Detta projekt har syftat till att studera biofilters långtidsfunktion för rening av dagvatten, samt inverkan av kalla klimat och vägsalter vid vägunderhåll. Målet är att öka förståelsen för hur biofilter skall utformas, skötas och underhållas för långsiktigt god funktion för rening av dagvatten i urbana miljöer över tid och anpassning av anläggningar till olika klimat.

De huvudsakliga projektaktiviteterna har varit att studera:

- Hur design (filtermaterial, tillsatser, infiltrationsförmåga och försedimentering) påverkar rening av metaller i biofilter.
- Inverkan av kallt klimat och salt från vägunderhåll på rening av metaller
- Förekomst, ackumulering och koncentration av föroreningar (metaller och organiska ämnen) i biofilter och i försedimentering.

För ökad förståelse för:

- Hur ett biofilter skall designas, uppföras och underhållas för rening av dagvatten över tid.
- Förbättrad funktion av biofilter i kallt klimat (t ex i Sverige), samt att minska risker för läckage av metaller från biofilter över tid.
- Risker vid hantering av filtermaterial och sediment samt åtgärder vid hantering av förbrukat filtermaterial och sediment (metallers lakbarhet i sediment och filtermaterial) samt förbättrat drift och underhåll av anläggningar.

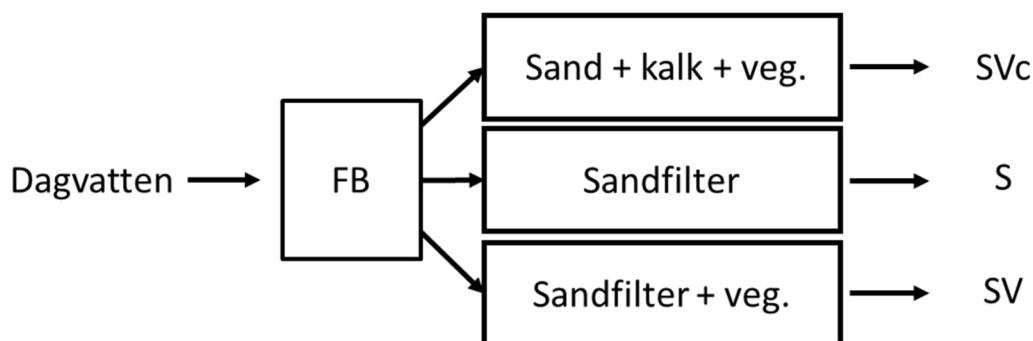
### 3 Metod och genomförande

För studier av biofilters reningsfunktion och effekter av design och inverkan av kallt klimat utfördes fullskaliga fältförsök på tre stora svenska testanläggningar i Sundsvall, Stockholm och Malmö. Kallt klimat kännetecknas av kalla temperaturer med frusen mark under vintern, tjäle och temperaturer under eller som fluktuerar kring 0°C (Kratky et al., 2017). Under dessa förhållanden kan filtermaterial med grövre kornstorleksfördelning vara fördelaktiga (Blecken et al., 2011; Zhao and Gray, 1999). Detta, då ett mer välldränerat filtermaterial har högre infiltrationsförmåga (högre hydraulisk konduktivitet) särskild vid låga temperaturer kring 0°C, eftersom en mindre mängd vatten finns i porer mellan partiklar under frysning (Caraco and Claytor, 1997). Att temperaturer fluktuerar kring 0°C är en klimatindikator och kallas för nollgenomgångar, ett fenomen som har blivit och kommer bli allt vanligare i Sverige och andra regioner med liknande klimat (SMHI, 2024).

Fältstudierna omfattar total 25 biofilter, vilka provtagits vid nederbörd under två års tid. Vid provtagning användes ISCO 6712 automatiska provtagare programmerade för volymproportionell provtagning. Flöden mättes med ISCO 730 Bubbler flow module.

Studien på biofilter i Sundsvall fokuserade på avlägsnande av metaller vid kloridpåverkan i ett kallt klimat. Sundsvalls biofilteranläggning består av stora filter som behandlar vägdagvatten från Sundsvallsbron och tillhörande trafikområden längs Europaväg E4 med en trafikbelastning på 13 000 fordon per dag (ÅDT). De tre olika filterkonfigurationer som studerades i Sundsvall (Figur 2) bestod av:

1. Filtersand (S).
2. Filtersand med vegetation (SV).
3. Filtersand med inblandning av kalk ( $\text{CaCO}_3$ ) och vegetation (SVc).



*Figur 2. Principskiss av större biofilteranläggning i Sundsvall för rening av vägdagvatten från Sundsvallsbron.*

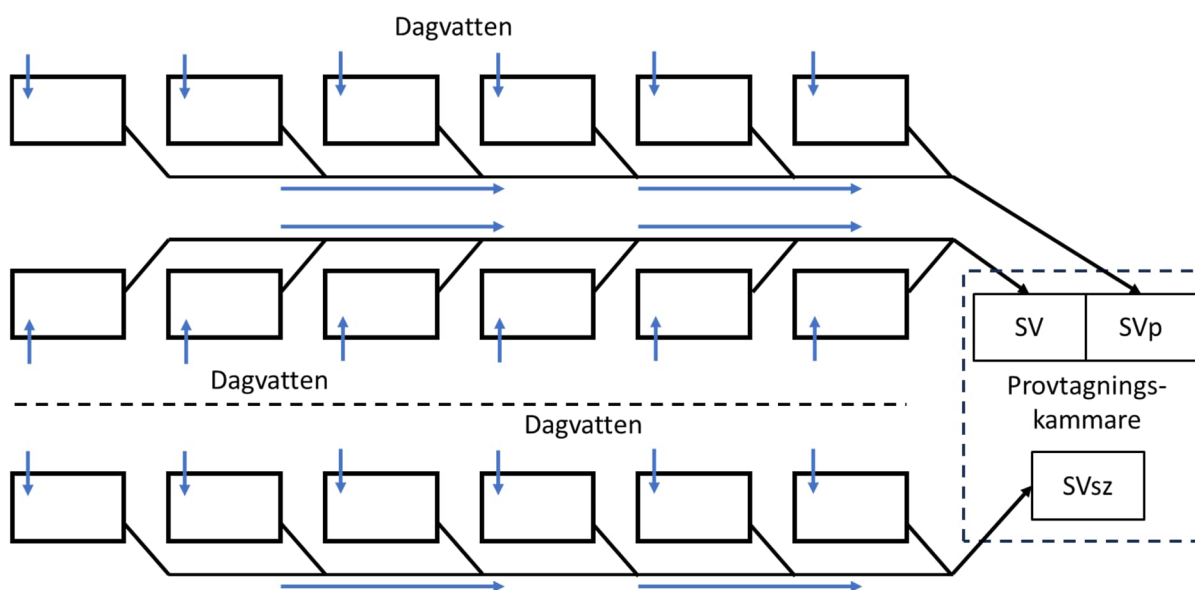
Anläggningen i Sundsvall är beläget i ett område med kontinentalt subarktiskt klimat (Köppens klimatklassificering, Kottek et al., 2006). Denna anläggningen är utformad enligt de tyska riktlinjerna för biofilteranläggningar som behandlar dagvatten från motorvägar (DWA, 2005) och hade varit i drift i 2–4 år vid provtagningstillfället. Det totala



avrinningsområdet för platsen var 8,2 ha och bestod av 4,7 ha hårda ytor (med bron som stod för 1,9 ha) och 3,5 ha gröna områden. Under nederbörd eller snösmältning leddes dagvatten från bron genom ett 100 m långt dagvattenrör (d=800 mm) till biofilteranläggningen.

I anläggningen i Malmö studerades rening av metaller från vägdagvatten längs en trafikerad gata i centrala Malmö i ett större system av biofilter. Anläggningen består av 18 biofilter uppdelat på tre sektioner, där varje sektion utgörs av sex seriekopplade biofilter (Figur 3) med tre olika filterkonfigurationer. Samtliga filtermaterial i Malmö har hög infiltrationsförmåga och är speciellt anpassade för kallare klimat (utvecklat vid LTU) med temperaturer som fluktuerar kring 0°C vintertid (Blecken et al., 2011; Zhao and Gray, 1999).

1. Sandfilter med överliggande vegetation (SV).
2. Sandfilter med vegetation och inblandning av pimpsten (SVp).
3. Sandfilter med vegetation och vattenmättad zon (SVsz).

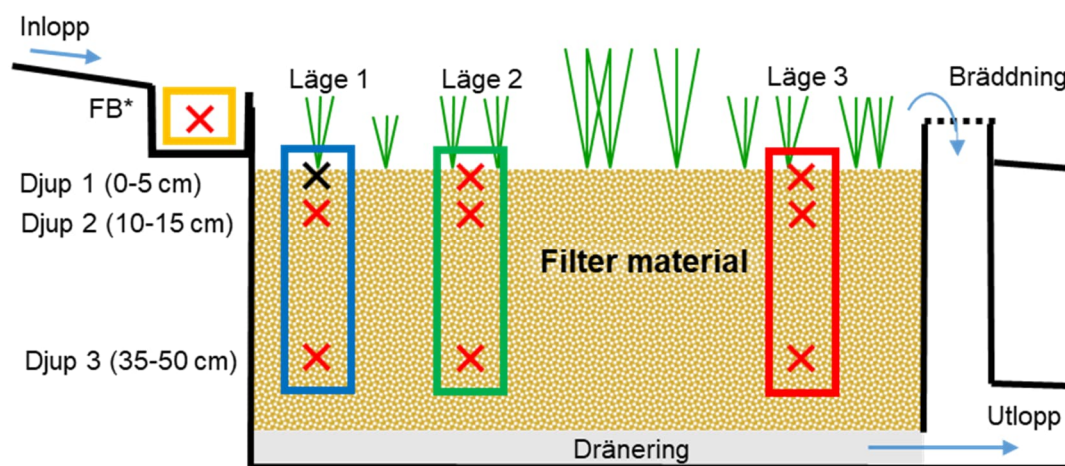


Figur 3. Principskiss av en omfattande biofilteranläggning i centrala Malmö för rening av urbant dagvatten.

Studien fokuserade på rening av metaller i dessa filtermaterial speciellt framtagna för kalla klimat, med högre hydraulisk konduktivitet och därmed hög infiltrationskapacitet. Dessa material har lägre frysrisk och är därför aktiva under en större del av året för rening av dagvatten jämfört med konventionella filtermaterial och renar därav en större del av totala årsvolymen. Dessa biofilter är därav även mer yteffektiva jämfört med biofilter med mer traditionella material och därför lämpliga i mer tätbefolkade miljöer eller där det är ont om plats.



För att studera förekomst, ackumulering och koncentration av föroreningar (metaller och organiska ämnen) i biofilter och i försedimentering utfördes en fältstudie av biofilter i Ohio, Michigan och Kentucky (USA), där prov på filtermaterial samlades in från 29 biofilter vilka varit i drift i 7–16 år. Filtrens avrinningsområden vilka huvudsakligen behandlar väg dagvatten bestod av stads kärnor, tätorter, industri- och handelsområden. Vald metodik för provtagning var en hypotesstyrd provtagning i likhet med metod tidigare använd bland annat av Tedoldi et al., (2017). Denna metodik syftar till förtätad datainsamling där förändringen är som störst och ger ofta en större resultatmängd till samma antal prover, till exempel fler prover nära inloppet, där koncentrationerna ofta är som högst (Figur 4). Samtliga prover analyserades vid ackrediterat laboratorium (ALS Global, 2022) för koncentration av sex metaller (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb och Zn) och från 12 filter analyserades även koncentration av 38 organiska föreningar (16 PAH, 7 PCB, 13 ftalater och 2 alkylfenoler). För undersökning av metallernas potentiella förmåga att lakas ut ur filtermaterial användes en femstegs sekventiell lakning på material från prov i läge 1, djup 1 (Figur 4). För att kunna jämföra resultat från provtagning av dagvattenssediment i USA med rening av dagvatten i svenska biofilter togs även referensfilterprover två svenska anläggningar, Malmö (beskrivning ovan), samt vid en anläggning i Stockholm bestående av fyra biofilter, där sediment samlades in i försedimentering.



Figur 4. Principskiss biofilter med djup och läge för provtagningspunkter. Sekventiell lakning har utförts på prov i Läge 1, djup 1 (svart kryss). \*Försedimentering (FB) provtogs vid 20 biofilter i USA, samt i 8 biofilter i Sverige (Stockholm och Malmö).

Data och statistiska analyser beskrivs närmare i avsnitt "3.5 Data analysis" i doktorsavhandlingen. Generellt sett användes Minitab® 20.4-programvaran för deskriptiv statistik, statistiska tester och låddiagram för att tolka data. För visualisering av huvudegenskaperna och identifiering av korrelationer i analysresultaten användes den multivariata dataanalysprogramvaran SIMCA 17. Eftersom de flesta dataset inte var normalfördelade användes en icke-parametrisk metod (Kruskal-Wallis test med signifikansnivå  $\alpha=0,05$ ) efter censurering av data vid den högsta rapporteringsgränsen

(Helsel, 2012) för test av statistisk signifikans för skillnader mellan de undersökta parametrarna, t ex koncentration, djup och plats i filtermaterial, eller för att bestämma den statistiska signifikansen mellan medianvärden i olika stadier. För att testa den statistiska signifikansen av korrelationen mellan klorid- och metallkoncentrationer användes parvis Spearman-korrelationstest.

## 4 Resultat

### 4.1 Rening av metaller

Generellt sett renades dagvatten effektivt från metaller i de studerade biofilteranläggningar (Tabell 1, SV och SVsz i Malmö samt S, SV och SVc i Sundsvall). För lösta metaller var reningen lägre eller negativ, dvs ingen rening eller läckage av tidigare ackumulerade metaller. Detta bekräftar resultat från tidigare studier observerade i laboratoriestudier (Blecken et al., 2009a; Hatt et al., 2007; Lange et al., 2022; Søberg et al., 2017; Sun and Davis, 2007).

*Tabell 1. Rening av totalmetall respektive lösta metaller i Malmö och Sundsvall för tre olika filterkonfigurationerna i respektive anläggning.*

|            |        |       | Median removal % |     |      |      |      |     |
|------------|--------|-------|------------------|-----|------|------|------|-----|
| Anläggning | Filter |       | Cd               | Cr  | Cu   | Ni   | Pb   | Zn  |
| Malmö      |        | SV    | 64               | 54  | 87   | 39   | 92   | 94  |
|            | SVp    | Total | 0                | -6  | 76   | 5    | 64   | 82  |
|            |        | SVsz  | 35               | 60  | 87   | 44   | 91   | 96  |
|            |        | SV    | -38              | -30 | 59   | -24  | 78   | 93  |
|            | SVp    | Löst  | -208             | -54 | 49   | -134 | 54   | 80  |
|            |        | SVsz  | -125             | -9  | 61   | -82  | 78   | 93  |
| Sundsvall  |        | S     | 26               | 53  | 48   | 50   | 42   | 37  |
|            | SV     | Total | 34               | 95  | 75   | 86   | 90   | 75  |
|            |        | SVc   | 49               | 94  | 85   | 92   | 29   | 94  |
|            |        | S     | -3               | 26  | -9   | -3   | -38  | 3   |
|            | SV     | Löst  | -125             | 49  | -106 | -46  | -237 | -21 |
|            |        | SVc   | 45               | 47  | -1   | 60   | -15  | 81  |

Studierna i Sundsvall visar att kalk ( $\text{CaCO}_3$ ) har en positiv effekt på rening av lösta metaller (Filter SVC, Cd, Cr, Ni och Zn), troligtvis på grund av höjt pH. Mest effektiv avskiljning av metaller observerades i sandfilter med vegetation. Metallerna Cu, Pb och Zn hade högre reningsgrad än Cd, Cr och Ni.

Resultat från studien i Malmö visar att filtermaterial speciellt anpassade till kallt klimat med mycket hög infiltrationsförmåga (Hydraulisk konduktivitet  $>1500 \text{ mm/hr}$ ) har effektiv avskiljning av Cu, Pb och Zn, metaller vilka särskilt har identifierats som giftiga i dagvatten (US EPA, 1983). Viss avskiljning observerades även för total koncentration av Cd, Cr och Ni, dock mindre effektivt för lösta koncentrationer.

Dessa resultat visar att grövre filtermaterial kan vara effektiva för biofilter i kalla klimat, eftersom de hanterar temperaturvariationer bättre (mindre frysrisk) och minskar risken för igensättning av filtren. Grövre filtermaterial ökar även den årliga volymen behandlat dagvatten och minskar översvämningsrisker, vilket gör dem lämpliga för mindre anläggningar i tätbebyggda områden. Även om dessa filter inte behandlar alla metaller lika effektivt som ett mer finkornigt filtermaterial, kan de fortfarande skydda vattendrag och recipienter genom att behandla en större andel av den årliga avrinningen.

Filtret med vattenmättad zon visade ingen skillnad i rening av metaller jämfört med filtret utan vattenmättad zon. Filter med pimpstenstillsatser (SVp) var mindre effektivt för avskiljning av metaller jämfört med de andra filtren i studien. Detta beror troligtvis på att pimpstenstillsatsen var mycket grov, vilket ledde till en extremt hög hydrauliska konduktivitet med kortare uppehållstid för vattnet, vilket minskar adsorptionen av metaller.

#### **4.1.1 Inverkan av klorider**

Studien visar att vägsalt ökar koncentrationen metaller i dagvatten, men att total avskiljning av metaller ändå är god. Dock påverkar kloriderna rening av lösta metaller negativt. Vid högre halter av klorider ökade koncentrationen av metaller efter filtrering i biofilter, vilket indikerar en urlakning av tidigare ackumulerade metaller från filtren.

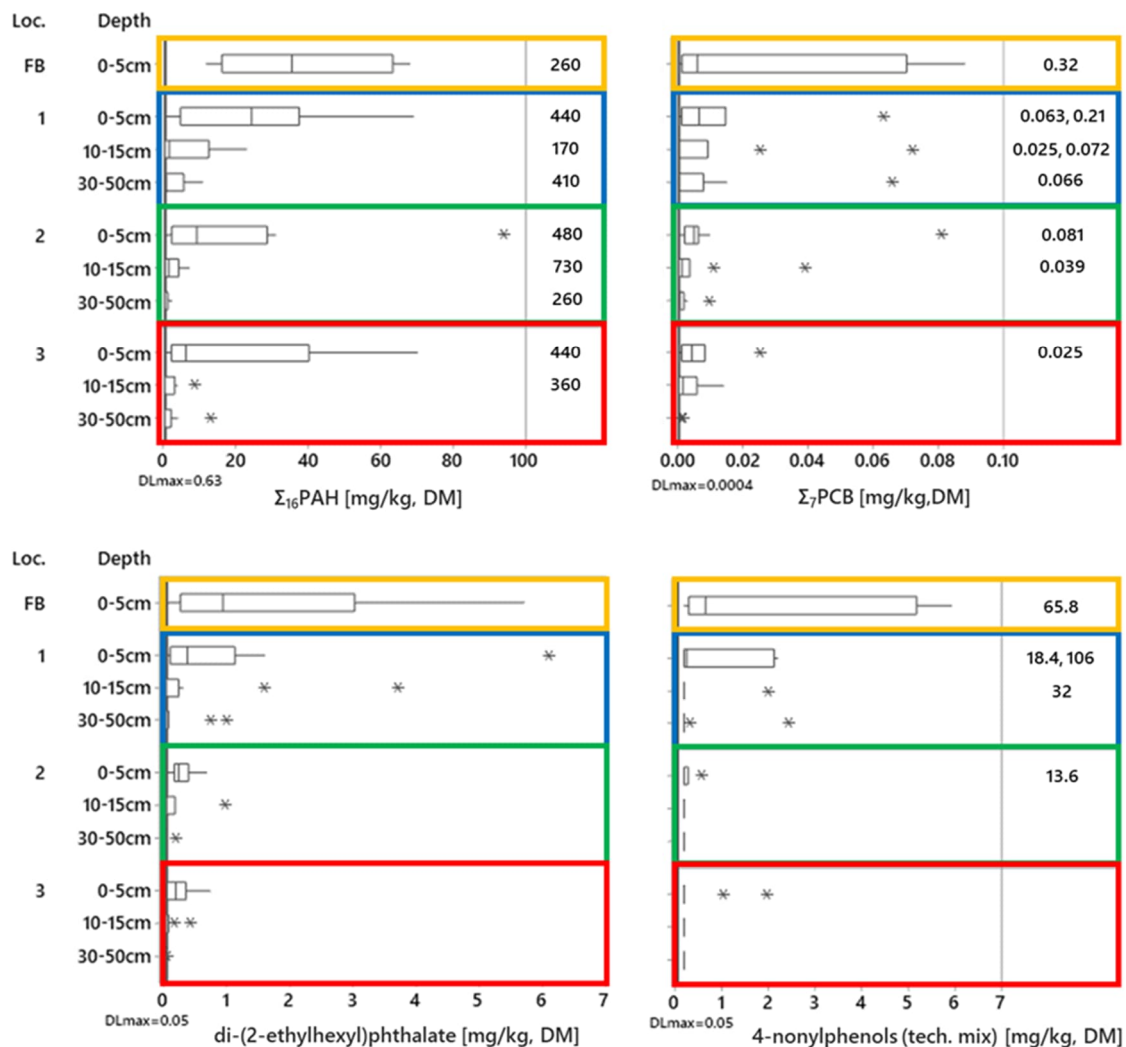
### **4.2 Ackumulering av föroreningar**

Analys av filterprover från äldre (7–17 år) biofilter i USA visar på ackumulation över tid av organiska ämnen och metaller i filtermaterial och i försedimentering.

#### **4.2.1 Organiska föroreningar**

Stor förekomst och höga koncentrationer främst av PAH, PCB och Ftalater men även alkylfenoler påvisades i uttagna proverna. Högst halter påträffades i de översta lagren (Figur 5), i försedimentering och nära inlopp. 34 av de 38 undersökta organiska föroreningar upptäcktes i minst ett av 116 prover av filtermaterial. PAH hittades över detektionsgränsen i 79 % av alla prover och påträffades i samtliga tolv undersökta filter.

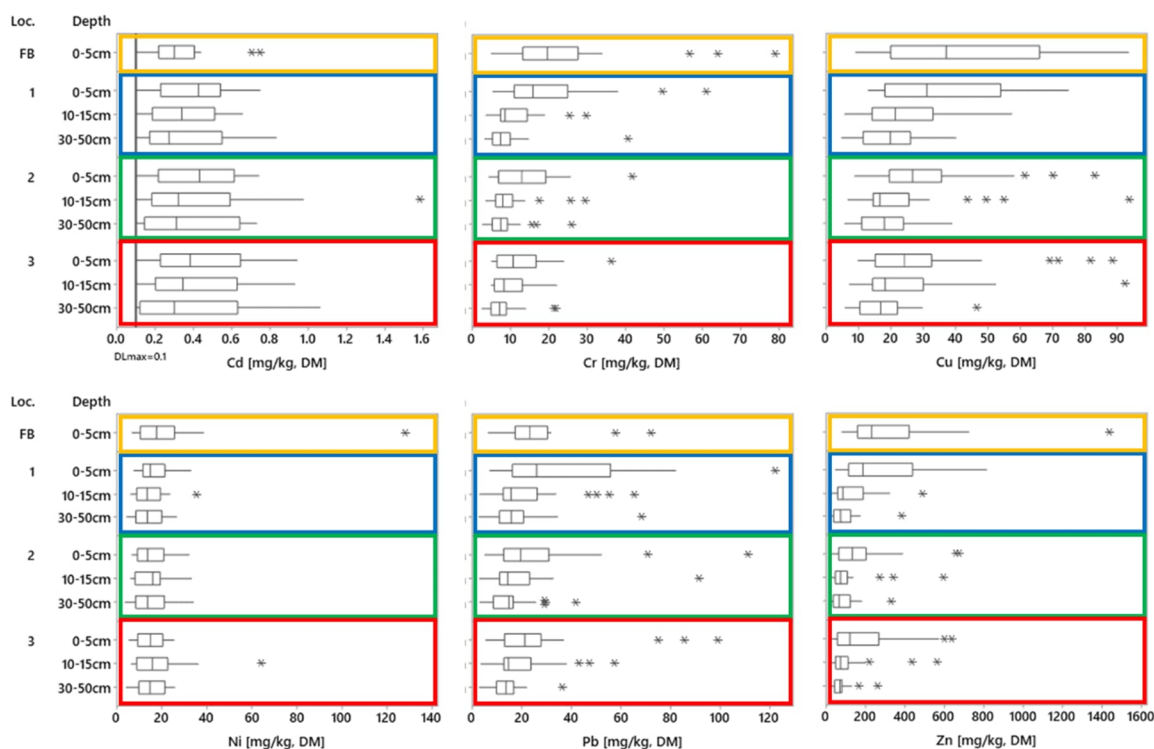
PCB påvisades i 77 % av alla prover och utgjorde tillsammans med PAH den mest frekventa gruppen av organiska föroreningar. Ftalater upptäcktes i elva undersökta filter och i 59 av 116 prover (51 %). Tio av de 13 undersökta ftalaterna påvisades i minst ett prov. Alkylfenoler hade den lägsta förekomsten av undersökta organiska föroreningar. Den mest frekventa alkylfenolen var nonylfenol vilken upptäcktes i 10 av 12 filter och i 26 av 115 prover (23 %). För PAH, ftalater och för nonylfenol var koncentrationer statistiskt sett högre (Kruskal-Wallis,  $p < 0,05$ ) i försedimenteringen än i filtermaterialet och för PCB observerades en liknande trend. För PAH och PCB var molekyler med högre molekyylvikt mer vanligt förekommande än molekyler med lägre molekyylvikt och för PAH hade även substanser med hög och medelhög molekyylvikt högre halter än PAH med lägre molekyylvikt. Koncentrationerna av PAH, PCB och ftalater var högst i ytskikten (Figur 5), men påträffades även i djupare lager om än mindre frekvent och i lägre koncentrationer. Alkylfenoler detekterades främst i det översta lagret nära inlopp och försedimentering.



Figur 5. Låddiagram med koncentrationer av Σ<sub>16</sub>PAH, Σ<sub>7</sub>PCB, di-2-ethylhexylftalat och 4-nonylfenol (tech. mix) i för sedimentering (FB) och tre lägen (loc.) i biofilter för tre olika djup (Depth). Varje läge i filtret är markerad med en färgad rektangel som motsvarar de i figur 4. Extremvärden redovisas med asterisk (\*) och i förekommande fall med siffror till höger i diagrammet.

## 4.2.2 Metaller

Alla metaller förutom Cd (dvs. Cr, Cu, Ni, Pb och Zn) hittades i samtliga 269 analyserade prover. Cd påvisades i 245 av 269 analyserade prover. En trend med minskande koncentrationer med ökat djup observerades för Cd, Cr, Cu, Pb och Zn men inte för Ni (Figur 6). Denna trend var statistiskt signifikant (Kruskall-Wallis,  $p < 0,05$ ) för Cr, Cu, Pb och Zn, men kunde även observeras för Cd i låddiagram (Figur 6). För Cr och Zn observerades även en tendens till minskande koncentrationer med ökande avstånd från inloppet, främst i det översta lagret av filtren. En liknande tendens observerades även för Cu och Pb, men skillnaden var inte statistiskt signifikant (Kruskal-Wallis,  $p = 0,05$ ). Cr, Cu och Zn uppvisade något högre koncentrationer i försedimenteringar än i filtermaterialet.

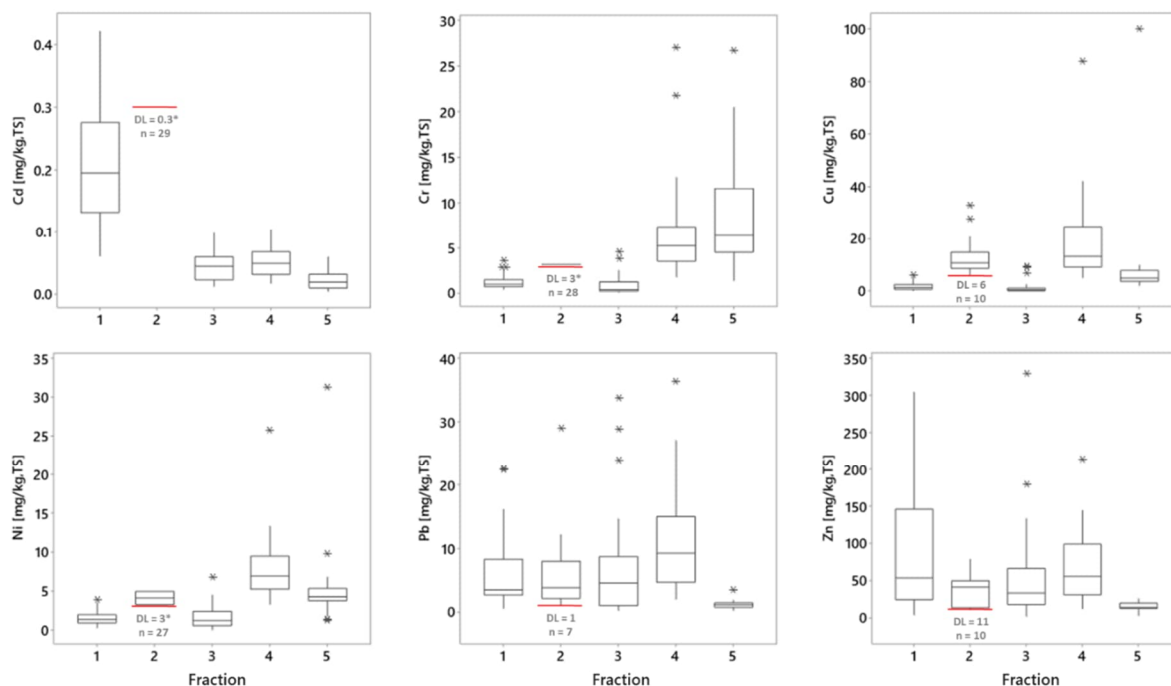


Figur 6. Låddiagram för totalkoncentration av Cd, Cr, Cu, Ni, Pb och Zn vid tre olika lägen (Loc.) och olika djup (Depth). Sekventiell lakning utfördes på prover i läge 1 vid djupet 1 (0-5 cm). Data för Cd med en förekomst på 90 % är censurerade till lägsta detektionsgräns ( $DL_{max} = 0,1$  mg/kg, DM). Varje läge i filtret är markerad med en färgad rektangel som motsvarar dem i figur 4.

## 4.2.3 Sekventiell lakning

En femstegs sekventiell lakning utfördes för metaller (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) från filterprov i läge 1, djup 1 (Figur 4). Lakningen beskriver metallers mobilitet i filtermaterial där steg 1 efterliknar lätt lakade former vilka kan frigöras från ett biofilter vid nederbörd

och bli ett hot mot omgivningen. Lakningssteg 5 efterliknar mer extrema förhållanden där även stabilare former kan lakas ur, förhållanden vilka sannolikt inte förekommer i ett biofilter. Resultaten från den sekventiella lakningen visade att alla undersökta metaller var spridda över alla fem fraktioner (förutom Cd i fraktion 2 som var under detektionsgränsen) och därför i varierande grad är potentiellt tillgängliga i filtermaterial (Figur 7). Cd var den mest lakningsbenägna metallen och Cr den med lägst lakbarhet.



Figur 7. Låddiagram för fraktionering av metaller i fem fraktioner. För alla metaller anges detektionsgränsen (DL) i fraktion 2 och markeras med en horisontell linje. "n" anger antalet värden under DL av totalt 29 prover. \* Anger att för Cd, Cr och Ni hade ett prov i analysen en högre DL (dubbelt värde) jämfört med de andra DL (dvs. CdDL=0,3 för 28 prover och CdDL=0,6 för ett prov, CrDL=3 för 27 prover och CrDL=6 för ett prov, NiDL=3 för 26 prover och NiDL=6 för ett prov).

### 4.3 Försedimentering

Generellt var koncentrationer högst i försedimenteringen (FB i Figur 5 och Figur 6). Dock innehåller prover från en försedimentering endast dagvattensediment, medan ett materialprov från filtermaterialet innehåller en blandning av ursprungligt filtermaterial och dagvattensediment. Därav kan man förvänta sig högre halter i en försedimentering. Vidare, eftersom försedimenteringen endast är en mindre del av biofiltret (<10%) så sker den största ackumuleringen av föroreningar i filtermaterialet, vilket därför är den parameter i ett biofilter som har störst betydelse för avskiljning av föroreningar.

## 5 Slutsatser

Denna rapport beskriver en studie av bioretentionssystem för dagvatten med avseende på vattenkvalitetsbehandling och långsiktig förorening. Syftet med studien var att öka kunskapen om:

- (i) Design, såsom olika filtermaterialkonfigurationer (inklusive vegetation, kalk, pimpsten) och egenskaper (infiltrationskapacitet), och hur de påverkar rening av metaller i biofilter.
- (ii) Inverkan av vägsalter på rening av metaller.
- (iii) Ackumulering av organiska föroreningar och metaller i bioretentionsfiltermaterial och i försedimentering, samt dess förekomst, koncentration, fördelning och/eller tillgänglighet.

Resultaten visar att rening med sandbaserade filtermaterial för avlägsnande av metaller generellt sett är bra för totala metaller i dagvatten, mindre effektivt för lösta metaller. Mest effektiv är rening av total koncentration av Cu, Pb och Zn, metaller som i denna studie till en större utsträckning var partikelbundna. Filtermaterial med hög infiltrationskapacitet, speciellt anpassade för kalla klimat visade generellt högt avlägsnande av totala metaller och mindre effektivt för lösta metaller. Kalk ( $\text{CaCO}_3$ ) visade på en positiv effekt för rening av metaller, och denna effekt var särskilt effektiv för lösta fraktionerna. Vegetation visade på en övergripande positiv effekt för rening av totala metaller, dock ej för lösta metaller. Tillsats av pimpsten i denna studie minskade avskiljning både av totala och lösta metaller. En vattenmättad zon visade ingen effekt på rening av metaller i denna studie. Vidare visar denna studie att klorider som används vid vägunderhåll (vid kalla temperaturer) har en negativ inverkan på rening av metaller. Denna effekt var särskilt tydligt för lösta metaller, medan de flesta totala metaller (Cr, Cu, Ni, Pb och Zn) fortfarande uppvisade hög reningsgrad. En tillsats av kalk i filtermaterialet visade dock positiv effekt med ökad reningsgrad även under inverkan av klorider och då särskilt för lösta metaller.

Studier av filtermaterial och sediment visar att metaller (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb och Zn) och organiska föroreningar (16 PAH:er, 7 PCB:er, ftalater) var vanligt förekommande, medan alkylfenoler visade på lägre förekomst. Organiska föroreningar hittades i högst koncentrationer i försedimentering och i de övre 10 cm av filtermaterialet, varefter koncentrationer minskade med ökande djup i filtret. För metaller observerades en liknande, men mindre tydlig trend för Cr, Cu, Pb och Zn. Fraktionering av metaller med en 5-stegs sekventiell lakning visar att alla studerade metaller har en potentiell risk för urlakning över tid. Risken för urlakning var högst för Cd, Zn och Pb, medan Cr, Cu och Ni var mer stabila i filtermaterialet. Viktigt att notera är att dessa metaller även har en potentiell risk för urlakning från filtermaterial eller sediment som avlägsnas från biofilter.

Resultaten från studier av dagvattenbehandling och ackumulering av föroreningar visar att rening av metaller är effektivt och att både metaller och organiska föroreningar ackumuleras i filtermaterial över tid, främst i det översta lagret. Även om metaller kan läcka t.ex. när vägsalt används för vägunderhåll, så indikerade ackumuleringsstudierna att det ändå sker en långsiktig ackumulering av metaller i filtren, varför filtren har en långsiktigt positiv effekt för behandling av dagvatten.



## 5.1 Praktisk tillämpning

Resultaten från dessa studier av rening och ackumulering av föroreningar kan bidra till förbättrad design och underhåll för långsiktigt hållbara biofilter. Detta är särskilt viktigt vid utformning av anläggningar anpassade till kalla klimat, t.ex. där temperaturen fluktuerar runt noll grader Celsius. Studierna av rening visar vilka filtermaterial som skall väljas och studier av ackumulering och lakning bidrar med kunskap om hur anläggningarna skall skötas över tid.

Vid design av biofilter rekommenderas filter med hög infiltrationsförmåga i kallare klimat där temperaturer delar av året fluktuerar kring 0°C. Filter med vegetation och filtermaterial med kalktillsatser rekommenderas för bättre metallbehandling. En försedimentering minskar föroreningsbelastningen på filtermaterialet samt minskar risken för igensättning, varför ett filters operativa livslängd förlängs. Viktigt är dock att försedimenteringen underhålls kontinuerligt och rengörs vid behov.

Då föroreningar främst ackumuleras i de översta lagren av filtermaterialet, innebär det att regelbundet utbyte av översta lagret (0–10 cm) också avlägsnar en stor andel av ackumulerade föroreningarna. Dock måste detta material då sannolikt föras till deponi. Även försedimenteringar innehåller sediment med höga halter vilka bör avlägsnas regelbundet för minskad risk för igensättning av filter samt läckage metaller från filter. Viktigt är även vid drift och underhåll att personal har erforderlig kunskap om anläggningars funktion samt erforderligt personligt skydd vid arbete med sannolikt förorenat material. Att särskilt beakta är även lokala krav för skydd av recipient och nedströms vattenförekomster. Vegetation har i studien visat sig ha en positiv effekt på rening av t ex metaller, dock finns risk för läckage av näringsämnen från vegetation eftersom att biofilter generellt sett är mindre effektiva för kväverening (Davis et al., 2006) varför växtlighetens positiva egenskaper för rening av metaller bör vägas mot recipientens känslighet för näringsämnen. Växter bör i första hand väljas med särskild tålighet mot salt och i enlighet med lokal växt zon enligt köppen (Kottek et al., 2006; Lange et al., 2020). Vidare bör perenner väljas före annueller samt undvikande av växter som kräver gödsling.

En vattenmättad zon kan dock enligt tidigare studier förbättra kväverening (Biswal et al., 2022) och kan därför vara att rekommendera även om den inte har någon effekt på rening av metaller.

## 6 Rekommenderade vidare studier

Ett antal områden har i denna studie identifierats som intressanta för vidare studier;

- Studier av kort- respektive långtidfunktion vid olika underhåll krävs för ökad förståelse av ackumulering och fördelningen av metaller, organiska föroreningar, andra partikelbundna och lösta föroreningar i biofilter.
- Denna studie inkluderar inte biologisk nedbrytning då information saknades om filtrens föroreningsbelastning. Kompletterande mätningar av dagvattenkvalitet och flöde in respektive ut ur försedimentering och i filtermaterial skulle kunna möjliggöra massbalansberäkningar. Detta skulle kunna ge information om fördelning av mängden föroreningar mellan filtermaterial och försedimentering men också om urlakning och biologisk nedbrytning av föroreningar i biofilter.
- Massbalans studier på försedimentering och filter skulle även kunna ge information om biologisk nedbrytning men även effekter av atmosfäriskt nedfall och andra källor till föroreningar i filtermaterialet mer än det som kommer till filtren via dagvattnet.
- Tidigare studier har visat på variationer i utsläpp av föroreningar över tid i biofilter (Markiewicz et al., 2017). Därav skulle kontinuerlig provtagning av filtermaterial från tidigare provtagna platser tillsammans med riktade provtagningskampanjer över årscykler och längre tidsperioder möjliggöra en bredare förståelse av filtrens funktion över tid.
- Studier vilka omfattar en större spridning i ålder mellan olika biofilter, med fördelning mellan nyare och äldre filter, vilka har varit i drift under längre tid. Detta skulle kunna ge information om trender för ackumulering av föroreningar som man kan förvänta i biofilter i drift över tid.
- På grund av skillnader mellan olika nationella och regionala lagar och regler samt användande av olika byggmaterial rekommenderas studier som inkluderar provtagning från olika länder. Detta för att utvärdera inverkan av hur geografiska skillnader i temperatur, luftfuktighet och nederbörd påverkar ett biofilter och dess ackumulation av metaller, organiska- och andra föroreningar. Resultat från fältstudier är till viss del platsspecifik, men begränsas också av de analyser och metoder som används. Studier från andra geografiska platser och av andra föroreningar skulle därför bidra till en bredare förståelse av filtrens funktion.
- Då filtermediets egenskaper påverkar ackumulation och adsorption av såväl lösta som partikelbundna föroreningar behövs ytterligare studier av olika sorters filtermaterial, till exempel med olika kornstorleksfördelning, materialsammansättning och användning av tillsatser (med innehåll av biokol, torv, kalkrika material eller pimpsten).

# Litteraturförteckning

## Publikationslista

1. Svenskt Vatten utveckling, Rapport Nr 2024-17  
Dagvattenbiofilter och regnbäddar – rening och ackumulering av föroreningar  
Godecke Blecken, Katharina Lange, Ali Beryani, Robert Furén, Heléne Österlund, Kelsey Flanagan, Maria Viklander.
2. Naturvårdsverket, Slutrapport Projekt NV-03810-23  
Ackumulering av perfluoralkylsubstanser (PFAS) och deras prekursorer i regnbäddar och biofilter för dagvattenrening  
Ali Beryani, Robert Furén, Heléne Österlund, Maria Viklander, Godecke-Tobias Blecken.
3. Occurrence, concentration, and distribution of 38 organic micropollutants in the filter material of 12 stormwater bioretention facilities.  
Furén, R., Flanagan, K., Winston, R. J., Tirpak, R.A., Dorsey, J. D., Viklander, Blecken, G.-T. Published in Science of the Total Environment, 2022.
4. Fractionation of metals by sequential extraction in bioretention filters for stormwater treatment: Field study.  
Furén, R., Österlund, H., Winston, R. J., Tirpak, R.A., Dorsey, J. D., Smith, J. Viklander, Blecken, G.-T. Published in Environmental Science: Water Research & Technology, 2023.
5. Occurrence and Concentration of 6 Metals and 28 Organic Micropollutants in the Forebays of Bioretention Facilities.  
Furén, R., Winston, R. J., Tirpak, R.A., Dorsey, J. D., Viklander, Blecken, G.-T. Published in Journal of Sustainable Water in the Built Environment, 2025.
6. Occurrence, Concentration, and Distribution of 35 PFASs and Their Precursors Retained in 20 Stormwater Biofilters  
Ali Beryani, Robert Furén, Heléne Österlund, Andrew Tirpak, Joseph Smith, Jay Dorsey, Ryan J. Winston, Maria Viklander and Godecke-Tobias Blecken  
Published in Environmental Science & Technology, 2024
7. Abundance, distribution, and composition of microplastics in the filter media of nine aged stormwater bioretention systems  
Katharina Lange, Robert Furén, Helene Österlund, Ryan Winston, R. Andrew Tirpak, Kerstin Nordqvist, Joseph Smith, Jay Dorsey, Maria Viklander, Godecke-Tobias Blecken.  
Published in Chemosphere, 2023
8. Occurrence and concentrations of organic micropollutants in bioretention filter media  
Furén, R., Flanagan, K., Winston, R. J., Tirpak, R.A., Dorsey, J. D., Viklander, Blecken, G.-T  
Conference paper Nordiwa 2021
9. Stormwater bioretention: Occurrence and accumulation of metals, PAHs, PCBs, alkylphenols, phthalates, PFASs and microplastics  
Furén, R., Flanagan, K., Österlund, H., Lange, K., Beryani, A., Winston, R. J., Tirpak, R.A., Dorsey, J. D., Smith, J. Viklander, Blecken, G.-T.  
Conference paper ICUD2024

10. Occurrence, concentration and pathways of emerging, contemporary and legacy contaminants in horizontal and vertical flow wetlands for stormwater treatment

Godecke Blecken, Kelsey Flanagan, Robert Furén, Katharina Lange  
Conference paper

Publikation 3,4, och 5 ingår i doktorsavhandling tillsammans med ytterligare två artiklar som är Under review. Ytterligare en publikation är planerad under våren 2025.

## **Presentationslista**

- Swedish water research and innovation conference 2020  
Presentation and participation 2020-12-08
- ICUD 2020 International conference on urban drainage  
Paper submission  
Participation 8th – 10th of December 2020
- NORDIWA 2021 international conference  
Paper submission  
Participation and presentation 2021-10-01
- ICUD2024 - 16th International Conference of urban drainage  
Paper submission,  
Participation and presentation 2024-06-11
- DRIZZLE, Lunch presentation 2022, 2024
- DRIZZLE, årlig partstämman 2019, 2021
- Dag&Nät, kompetensnätverk VA-teknik, 2023
- Swedish water, 2020. Conference.

## Referenslista

- Al-Rubaei, A.M., Stenglein, A.L., Viklander, M., Blecken, G.-T., 2013. Long-Term Hydraulic Performance of Porous Asphalt Pavements in Northern Sweden. *J. Irrig. Drain. Eng.* 139, 499–505. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000569](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000569)
- Al-Rubaei, A.M., Viklander, M., Blecken, G.-T., 2015. Performance upkeep of 30 Swedish wet ponds for stormwater treatment. Presented at the NORDIWA 2015 - 14th Nordic Wastewater Conference, Bergen, Norway.
- ALS global, 2022. ALS Scandinavia [WWW Document]. ALS Glob. URL <https://www.alsglobal.se/> (accessed 11.8.21).
- Barbosa, A.E., Fernandes, J.N., David, L.M., 2012. Key issues for sustainable urban stormwater management. *Water Res.* 46, 6787–6798. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.029>
- Bergman, M., Hedegaard, M.R., Petersen, M.F., Binning, P., Mark, O., Mikkelsen, P.S., 2011. Evaluation of two stormwater infiltration trenches in central Copenhagen after 15 years of operation. *Water Sci. Technol.* 63, 2279–2286. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.158>
- Biswal, B.K., Vijayaraghavan, K., Adam, M.G., Lee Tsen-Tieng, D., Davis, A.P., Balasubramanian, R., 2022. Biological nitrogen removal from stormwater in bioretention cells: a critical review. *Crit. Rev. Biotechnol.* 42, 713–735. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1969888>
- Blecken, G.-T., Hunt, W.F., Al-Rubaei, A.M., Viklander, M., Lord, W.G., 2017. Stormwater control measure (SCM) maintenance considerations to ensure designed functionality. *Urban Water J.* 14, 278–290. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2015.1111913>
- Blecken, G.-T., Marsalek, J., Viklander, M., 2011. Laboratory Study of Stormwater Biofiltration in Low Temperatures: Total and Dissolved Metal Removals and Fates. *Water. Air. Soil Pollut.* 219, 303–317. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0708-2>
- Blecken, G.-T., Zinger, Y., Deletić, A., Fletcher, T.D., Viklander, M., 2009a. Influence of intermittent wetting and drying conditions on heavy metal removal by stormwater biofilters. *Water Res.* 43, 4590–4598. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.07.008>
- Blecken, G.-T., Zinger, Y., Deletić, A., Fletcher, T.D., Viklander, M., 2009b. Impact of a submerged zone and a carbon source on heavy metal removal in stormwater biofilters. *Ecol. Eng.* 35, 769–778. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.009>
- Caraco, D., Claytor, R., 1997. Stormwater BMP Design Supplement for Cold Climates.
- Croft, K., Kjellerup, B.V., Davis, A.P., 2024. Interactions of particulate- and dissolved-phase heavy metals in a mature stormwater bioretention cell. *J. Environ. Manage.* 352, 120014. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.120014>
- Davis, A.P., Hunt, W.F., Traver, R.G., Clar, M., 2009. Bioretention Technology: Overview of Current Practice and Future Needs. *J. Environ. Eng.* 135, 109–117. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2009\)135:3\(109\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:3(109))
- Davis, A.P., Shokouhian, M., Sharma, H., Minami, C., 2006. Water Quality Improvement through Bioretention Media: Nitrogen and Phosphorus Removal. *Water Environ. Res.* 78, 284–293. <https://doi.org/10.2175/106143005X94376>

- Davis, A.P., Shokouhian, M., Sharma, H., Minami, C., Winogradoff, D., 2003. Water Quality Improvement through Bioretention: Lead, Copper, and Zinc Removal. *Water Environ. Res.* 75, 73–82. <https://doi.org/10.2175/106143003X140854>
- DWA, 2005. Merkblatt DWA-M 178: Empfehlungen für Planung, Bau und Betrieb von Retentionsbodenfiltern zur weitergehenden Regenwasserbehandlung im Misch- und Trennsystem. DWA.
- Graham, E.I., Lei, J.H., 2000. Stormwater Management Ponds and Wetlands Sediment Maintenance. *Water Qual. Res. J.* 35, 525–540. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2000.031>
- Hatt, B.E., Deletic, A., Fletcher, T.D., 2007. Stormwater reuse: designing biofiltration systems for reliable treatment. *Water Sci. Technol.* 55, 201–209. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.110>
- Helsel, D.R., 2012. Statistics for censored environmental data using Minitab and R, 2nd ed. ed, Wiley series in statistics in practice. Wiley, Hoboken, N.J.
- Hoyt, S., Brown, T., 2005. Stormwater Pond and Wetland Maintenance Concerns and Solutions, in: Impacts of Global Climate Change. Presented at the World Water and Environmental Resources Congress 2005, American Society of Civil Engineers, Anchorage, Alaska, United States, pp. 1–12. [https://doi.org/10.1061/40792\(173\)226](https://doi.org/10.1061/40792(173)226)
- Hsieh, C.-H., Davis, A.P., 2005. Multiple-event study of bioretention for treatment of urban storm water runoff. *Water Sci. Technol.* 51, 177–181. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0589>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.* 15, 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Kratky, H., Li, Z., Chen, Y., Wang, C., Li, X., Yu, T., 2017. A critical literature review of bioretention research for stormwater management in cold climate and future research recommendations. *Front. Environ. Sci. Eng.* 11, 16. <https://doi.org/10.1007/s11783-017-0982-y>
- Lange, K., Viklander, M., Blecken, G.-T., 2022. Investigation of intra - event variations of total, dissolved and truly dissolved metal concentrations in highway runoff and a gross pollutant trap – bioretention stormwater treatment train. *Water Res.* 216, 118284. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118284>
- Lange, K., Viklander, M., Blecken, G.-T., 2020. Effects of plant species and traits on metal treatment and phytoextraction in stormwater bioretention. *J. Environ. Manage.* 276, 111282. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111282>
- Lindsey, G., Roberts, L., Page, W., 1992. Inspection and maintenance of infiltration facilities. *J. Soil Water Conserv.* 47, 481–486.
- Markiewicz, A., Björklund, K., Eriksson, E., Kalmykova, Y., Strömvall, A.-M., Siopi, A., 2017. Emissions of organic pollutants from traffic and roads: Priority pollutants selection and substance flow analysis. *Sci. Total Environ.* 580, 1162–1174. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.074>
- Müller, A., Österlund, H., Marsalek, J., Viklander, M., 2020. The pollution conveyed by urban runoff: A review of sources. *Sci. Total Environ.* 709, 136125. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136125>
- SMHI, 2024. SMHI Klimatindikatorer [WWW Document]. SMHI. URL <https://www.smhi.se/klimat/klimatet-da-och-nu/klimatindikatorer/nollgenomgangar?l=null&l=null>
- Søberg, L.C., Viklander, M., Blecken, G.-T., 2017. Do salt and low temperature impair metal treatment in stormwater bioretention cells with or without a submerged

- zone? *Sci. Total Environ.* 579, 1588–1599.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.179>
- Starzec, P., Lind, B.B., Lanngren, A., Lindgren, Å., Svenson, T., 2005. Technical and Environmental Functioning of Detention Ponds for the Treatment of Highway and Road Runoff. *Water. Air. Soil Pollut.* 163, 153–167.  
<https://doi.org/10.1007/s11270-005-0216-y>
- Sun, X., Davis, A.P., 2007. Heavy metal fates in laboratory bioretention systems. *Chemosphere* 66, 1601–1609.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.08.013>
- SV 2016-05, 2016. Rapport Nr 2016-05 (Kunskapssammanställning dagvattenrening No. Kunskapssammanställning dagvattenrening).
- Tedoldi, D., Chebbo, G., Pierlot, D., Kovacs, Y., Gromaire, M.-C., 2017. Assessment of metal and PAH profiles in SUDS soil based on an improved experimental procedure. *J. Environ. Manage.* 202, 151–166.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.063>
- Tirpak, R.A., Afrooz, A.N., Winston, R.J., Valenca, R., Schiff, K., Mohanty, S.K., 2021. Conventional and amended bioretention soil media for targeted pollutant treatment: A critical review to guide the state of the practice. *Water Res.* 189, 116648. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116648>
- US EPA, 1983. US-EPA, 1983. Final Report of the Nationwide Urban Runoff Program. U.S. Environmental Protection Agency, Water Planning Division; Washington DC, USA. [WWW Document]. URL  
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/9100JH5T.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1981%20Thru%201985&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5CZYFILES%5CINDEX%20DATA%5C81THRU85%5CTXT%5C0000018%5C9100JH5T.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1#>
- Zhang, K., Randelovic, A., Page, D., McCarthy, D.T., Deletic, A., 2014. The validation of stormwater biofilters for micropollutant removal using in situ challenge tests. *Ecol. Eng.* 67, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.004>
- Zhao, L., Gray, D.M., 1999. Estimating snowmelt infiltration into frozen soils. *Hydrol. Process.* 13, 1827–1842. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199909\)13:12/13<1827::AID-HYP896>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199909)13:12/13<1827::AID-HYP896>3.0.CO;2-D)